Vol.13, No.3, Autumn 2024, pp.214-246 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.86464.1456 Open access

Projection changes of extreme precipitation with different return periods in Iran based on the ensemble approach of 10 CMIP6 models in the near future

Sakineh Khansalari[a], Seyede Atefeh Mohammadi[b], Zahra Ghassabi[a*], Hasan Salehi[c]

[a] *Assistant Professor in Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran.*
[b] *Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran.*
[c] *Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province Meteorological Administration, Yasuj, Iran.*

Received: 20 January 2024 ***Revised: 6 April 2024*** ***Accepted: 11 May 2024***

Abstract

In the current study, changes in the amount of extreme precipitation with different return periods for the period 2026–2050 were analyzed using the weighted combination of 10 CMIP6 models under different scenarios. The spatial and temporal ranking of the historical simulation performance of the 10 CMIP6 models in Iran was used to determine the weights for each model. Subsequently, a rank-based weighting method was employed to project extreme precipitation levels in the study area.
For extreme precipitation analysis, the best statistical distribution was selected for each station based on historical data. In 84% of the stations, the Log-Pearson Type 3 distribution was identified as the best fit using the chi-square test for both the historical period (1990–2014) and future scenarios.
A comparison between the results of extreme precipitation for the historical and future periods revealed that the percentage of change in projected extreme precipitation was notably higher under the SSP2-4.5 scenario compared to the other two scenarios. Moreover, with longer return periods, the percentage increase in extreme precipitation was greater, and the spatial extent of its occurrence also expanded. The greatest increases in projected extreme precipitation, exceeding 25%, were observed in the SSP1-2.6 scenario in Gorgan, Babolsar, Bojnord, Arak, Isfahan, and Zahedan stations. In the SSP2-4.5 scenario, the largest increases were recorded in Gorgan, Sanandaj, Hamedan, Arak, Kashan, Isfahan, Shiraz, Fasa, Minab, Bushehr, Bandar Abbas, Bandar Lengeh, and Abu Musi stations. Under the SSP5-8.5 scenario, the greatest increases occurred in Bojnord, Birjand, Arak, Kashan, and Semnan stations.
A significant increase in extreme precipitation was consistently observed in Arak station across all three scenarios. For the 200-year return period, extreme precipitation at Arak station increased by approximately 70% under the SSP1-2.6 and SSP2-4.5 scenarios, and by about 50% under the SSP5-8.5 scenario.

Keywords: Extreme Precipitation Events, Climate Projection Models, Return Period Analysis, CMIP6 Models, Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), Statistical Downscaling.

---

* .Corresponding author: Zahra Ghassabi Email: z-ghassabi@gmail.com Tel:+989125246850

How to cite this Article: Khansalari, S., Mohammadi, S. A., Ghassabia Z., & Salehi, H. (2024). Projection changes of extreme precipitation with different return periods in Iran based on the ensemble approach of 10 CMIP6 models in the near future. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(3),, 214-246.

جلد ۱۳، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳، ص ۲۴۶-۲۱۴

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی **DOI**: 10.22067/geoeh.2024.86464.1456 دسترسی آزاد

پیش‌نگری تغییرات مقدار بارش فرین با دوره بازگشت‌های مختلف در ایران بر اساس رویکرد همادی ده مدل CMIP6 در آینده نزدیک

سکینه خان‌سالاری- استادیار پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

سیده عاطفه محمدی- پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

زهرا قصابی[1]- استادیار پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

حسن صالحی- اداره کل هواشناسی استان کهگیلویه و بویر احمد، یاسوج، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۲/۱۰/۳۰ **تاریخ بازنگری:۱۴۰۳/۱/۱۸ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۲/۲۲**

چکیده

در پژوهش حاضر تغییرات مقدار بارش فرین با دوره بازگشت‌های مختلف در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۶ با ترکیب وزنی ۱۰ مدل CMIP6 در سناریوهای مختلف مطالعه شد. طبق رتبه‌بندی مکانی و زمانی ظرفیت‌های شبیه‌سازی تاریخی ۱۰ مدل CMIP6 در ایران، وزن‌های مربوط به هر یک از مدل‌ها به دست آمد. سپس با استفاده از روش وزن‌دهی مبتنی بر رتبه، پیش‌نگری مقدار بارش فرین در منطقه موردمطالعه انجام شد. در ادامه بارش‌های فرین در بهترین توزیع آماری منطبق بر داده‌ها برای هر یک از ایستگاه‌ها که در ۸۴ درصد ایستگاه‌ها توزیع log-Pearson type3 با آزمون کای-اسکوئر انتخاب گردید. در دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) و آینده در هر سه سناریو و دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه شد. مقایسه پیش‌نگری بارش‌های فرین با دوره تاریخی نشان داد که درصد تغییرات مقدار بارش فرین پیش-نگری شده در سناریو SSP2-4.5، نسبت به دو سناریو دیگر بیشتر است. همچنین به سمت دوره بازگشت‌های طولانی‌تر درصد افزایش مقدار بارش پیش‌نگری شده افزایش و منطقه رخداد آن نیز گسترش می‌یابد. بیشترین افزایش مقدار بارش فرین پیش‌نگری شده (بیشتر از ۲۵ درصد) در سناریو خوش‌بینانه در ایستگاه‌های گرگان، بابلسر، بجنورد،

[1] نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۵۲۴۶۸۵۰ Email:z.ghassabi@gmail.com

اراک، اصفهان و زاهدان، در سناریو میانه در ایستگاه‌های گرگان، سنندج، همدان، اراک، کاشان، اصفهان، شیراز، فسا، میناب، بوشهر، بندرعباس، بندرلنگه، ابوموسی و در سناریو بدبینانه در ایستگاه‌های بجنورد، بیرجند، اراک، کاشان و سمنان مشاهده شد. افزایش مقدار بارش فرین بیش از ۲۵ درصد در ایستگاه اراک در هر سه سناریو (حدود ۷۰ درصد در سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5، حدود ۵۰ درصد در سناریوی SSP5-8.5 در دوره بازگشت ۲۰۰ ساله) مشاهده شد.

کلیدواژه‌ها: رویدادهای بارش شدید،مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی،تحلیل دوره بازگشت،مدل‌های CMIP6، مسیرهای اجتماعی–اقتصادی مشترک، ریزگردانی آماری.

۱-مقدمه

سیل به‌عنوان یک واقعه اجتناب‌ناپذیر است که سالانه در نقاط مختلف جهان، جان و مال بسیاری از مردم بر اثر این رویداد طبیعی به خطر می‌افتد. وقوع این رویداد طبیعی، اندازه و تکرار آن ناشی از عوامل متعددی است که گرمایش جهانی سبب افزایش رویداد آن در مناطق مختلف جهان شده است.

درک و پیش‌نگری بارش‌های فرین به‌عنوان یکی از عوامل رخداد سیل برای ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم، سازگاری و آسیب‌پذیری از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است. مطالعات متعددی گزارش کرده‌اند که رویدادهای بارش فرین در قرن گذشته بیشتر شده‌اند و در قرن بیست و یکم نیز بیشتر اتفاق خواهند افتاد (برای مثال Peng et al., 2018; Dike, Lin & Ibe, 2020; Lee, Paek, Park & Boo, 2020; IPCC, 2020; Tang, Hu & Duan, 2021). دلیل اصلی رخداد این بارش‌های فرین افزایش دما است. وقتی دما افزایش می‌یابد، رطوبت ویژه اشباع جوّ بیشتر می‌شود و بنابراین طبق رابطه کلازیوس–کلاپیرون (Ruckstuhl, Philipona, Morland & Ohmura, 2007)، هوا می‌تواند حاوی مقدار بیشتری بخارآب باشد. بر اساس استدلال‌های نظری، میزان رطوبت جوّ به میزان ۷ درصد بر درجه کلوین در گرمایش جهانی بر طبق رابطه کلازیوس–کلاپیرون افزایش می‌یابد که منجر به بارش فرین شدیدتر می‌شود (Allen & Ingram, 2002; Trenberth et al, 2007; Zhang & Zhou; 2019). درواقع هنگامی‌که شرایط رخداد بارش ایجاد می‌شود، هوای اشباع بیشتر، منجر به بارش سنگین‌تر می‌شود (Berg, Moseley & Haerter, 2013).

مدل‌های اقلیمی جهانی به‌عنوان ابزارهای کارآمدی برای پیش‌نگری تغییرات آتی در اقلیم متوسط و فرین هستند (Chen, Sun, Chen & Zhou, 2012; Chen, 2013). مدل‌های اقلیمی یکی از ابزارهای اولیه برای محققان برای درک چگونگی تغییر آب‌وهوا در گذشته و در آینده است. این مدل‌ها فیزیک، شیمی و زیست‌شناسی جو، زمین و اقیانوس‌ها را با جزئیات بسیار شبیه‌سازی می‌کنند. مدل‌های اقلیمی با توسعه همه جانبه‌ای که داشته‌اند اما همچنان عدم قطعیت زیادی دارند و برای کاهش این عدم قطعیت میانگین همادی چند مدل برای پیش‌نگری ازجمله پیش‌نگری دما و یا بارش استفاده می‌شود (Sarabi, Dastorani & Zarrin, 2020; Sarabi, Dastorani & Zarrin, 2021; Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021a; Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2022a; Zareian, 2022; Khansalari & Mohammadi, 2023).

مدل‌های CMIP6 بهترین عملکرد را در تخمین بارش و تغییرات مکانی–زمانی آن در مناطق خشک و بسیار خشک کشور ایران از خود نشان می‌دهند. باوجوداین ارزیابی عملکرد تخمین‌های بارش از مدل‌های مختلف CMIP6 در مناطق اقلیمی مختلف ایران نشان می‌دهد که هر یک از مدل‌های CMIP6 به نظر می‌رسد که برای یک منطقه اقلیمی خاص، مناسب‌تر باشد (Yazdandoost, Moradian, Izadi & Aghakouchak, 2021). در رابطه با کاربست مدل CMIP6 در پیش‌نگری بارش فرین زرین و داداشی رودباری (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2022a)، به بررسی روزهای همراه با بارش سنگین در ایران با استفاده از سه مدل EC-Earth3، EC-Earth3-CC و EC-Earth3-Veg با روش میانگین وزنی با رویکرد مستقل پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد بارش سنگین در ایران تحت شرایط تغییر اقلیم آینده افزایش خواهد داشت. زرین و داداشی رودباری (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021b) به مطالعه شدت بارش شدید در ایران بر اساس مجموعه پنج مدل CMIP6 (GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRIESM2-0, UKESM1-0-LL) پرداخته‌اند و جهت ادغام نتایج حاصل از چندین مدل، از روش وزن‌دهی مستقل استفاده شده است که در بین این مدل‌ها، مدل MPI-ESM1-2-HR بالاترین عملکرد را نشان می‌دهد. همچنین زرین و همکاران (Zarrin, Dadashi-Roudbari & Hassani, 2022c) بر اساس مجموعه همان پنج مدل CMIP6 در آینده، پیش–نگری می‌کند که آستانه‌های بارش برای هر دو شاخص R10mm و R20mm در دهه‌های آینده در سواحل دریای خزر افزایش خواهد یافت ولی شاخص‌های بارش برای R95p در مناطق غربی و جنوب غربی وR99p

در مناطق جنوبی ایران کاهش خواهند داشت. همچنین تغییرات در شاخص‌های بارش فرین در حوزه دریاچه ارومیه با استفاده از ۱۶ مدل CMIP5 توسط جوان و همکاران (Javan, Movaghari & Park, 2023) موردبررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان دادند که بارش میانگین حوضه تا پایان قرن ۲۱ کاهش و شاخص روزهای خشک متوالی افزایش خواهد یافت. بااین‌حال، سایر شاخص‌های بیشینه بارش یک‌روزه و پنج‌روزه، روزهای بسیار مرطوب، روزهای متوالی مرطوب و بارش روزهای مرطوب نسبت به دوره مرجع کاهش خواهد یافت. همچنین خوانسالاری و محمدی (Khansalari & Mohammadi, 2023) پیش‌نگری بارش فرین در کشور ایران را با استفاده از پنج مدل CMIP6 (MPI-ESM1-2-HR، EC-Earth3، EC-Earth3-Veg، GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0) موردبررسی قرار داده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد افزایش مقدار بارش فرین بر افزایش تعداد روزهای وقوع بارش فرین تقدم دارد؛ به‌بیان‌دیگر این بارش‌های فرین در تعداد روزهای کمتری رخ خواهند داد که خود اعلام‌خطری برای رخداد بارش‌های سیل‌آسا می‌باشد.

برای پیش‌نگری دوره بازگشت بارش فرین روزانه در ایران از داده‌های مشاهداتی و کاربست یک مدل اقلیمی و یا میانگین همادی چند مدل و یا بررسی کارایی پایگاه داده بارش همادی–وزنی چند منبعی (MSWEP: Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation) و کاربست آن در تعیین دوره‌های بازگشت و بررسی احتمال رخداد بارش سالانه در ایران نیز مطالعاتی انجام شده است که این مطالعات در مقایسه با بررسی بارش فرین بسیار کم است (Hong, Javan, Shin & Park, 2021; Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2022b, Azizi & Nejatian, 2022). هونگ و همکاران (Hong et al., 2021) برای پیش‌نگری بارش فرین در ایران از داده‌های مشاهداتی و مدل همادی CMIP6 استفاده نموده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در ایران با دوره بازگشت ۲۰ ساله، سطح بارش بیشینه روزانه در سه سناریوی SSP245، SSP370 و SSP585 تا سال ۲۱۰۰ به ترتیب ۱۵/۶، ۲۳/۲ و ۲۸/۷ درصد افزایش می‌یابد. همچنین زرین و داداشی رودباری (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2022b) پژوهشی با هدف بررسی کارایی پایگاه داده بارش همادی–وزنی چند منبعی (MSWEP: Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation) و کاربست آن در تعیین دوره‌های بازگشت و بررسی احتمال رخداد بارش سالانه در ایران انجام داده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که این پایگاه داده

در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور بهترین کارایی و در پهنه پرباران و کوهستانی کمترین کارایی را دارد. همچنین بیشینه مقدار بارش محتمل در دوره‌های ۱ تا ۱۵ ساله در سواحل شمالی و بیشینه شدت آن در سواحل جنوبی ایران اتفاق می‌افتد. در این مطالعه احتمال رخداد بارش در ایران بین ۲/۰۳ تا ۳۲/۰۲ درصد بیان شده است. همچنین عزیزی و نجاتیان (Azizi & Nejatian, 2022) به بررسی شدت- مدت و دوره بازگشت شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI با مدل EC-EARTH در دشت ورامین پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شدت خشکسالی در آینده نسبت به دوره پایه بر اساس شاخص‌های SPI و SPEI به ترتیب ۸ و ۲۸ درصد افزایش دارد. همچنین دوره بازگشت خشکسالی‌های شدید تحت سناریوی RCP8.5 بر اساس شاخص SPEI در دوره‌های پایه و آتی به ترتیب ۸ و ۶ سال است که نشان دهنده کاهش دوره بازگشت خشکسالی‌های شدید و افزایش سال‌های خشک در آینده است.

با توجه به تغییر اقلیم و رویه افزایش دمای جهانی، درحالی‌که بسیاری از مناطق به‌احتمال‌زیاد خشک‌تر می‌شوند، مطالعه دوره بازگشت و احتمال رخداد بارش‌های فرین اهمیت زیادی دارند؛ اگرچه دوره‌های خشک طولانی‌تر این رویدادهای منفرد را از هم جدا می‌کنند (Mann & Kump, 2015). با توجه به افزایش دوره خشکی و کوتاه شدن دوره وقوع بارش و رخداد این بارش‌ها به‌صورت فرین نیاز به برنامه‌ریزی و مدیریت جهت حفاظت و بهره‌برداری بهینه از آب در دسترس در زمان رخداد فرین‌ها و کاهش خطرات بارش فرین مانند سیل‌های گسترده است. در این مطالعه با هدف بررسی تغییرات مقدار بارش فرین با دوره بازگشت‌های مختلف (۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال) در ایران بر اساس رویکرد همادی مدل‌های CMIP6 در آینده نزدیک، از روش وزن‌دهی نوین برای اختصاص به مدل‌های مختلف به‌کار رفته در پیش‌نگری بارش فرین و از شاخص‌های مناسب به‌منظور تعیین بارش‌های فرین در نقاط مختلف ایران استفاده شده است؛ بنابراین هدف اصلی پژوهش حاضر تعیین مقدار بارش فرین در دوره بازگشت‌های مختلف و تغییرات آن نسبت به دوره تاریخی تا اواسط قرن ۲۱ با ترکیب وزنی ۱۰ مدل مورداستفاده از مدل‌های CMIP6 و تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 است.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه موردمطالعه

ایران، واقع در منطقه‌ای با اقلیم گذرای بین مناطق خشک و نیمه‌خشک، تغییرات قابل‌توجهی در الگوهای بارش به‌ویژه از نظر مکانی و زمانی نشان می‌دهد. تنوع کوهساری کشور که شامل رشته‌کوه‌ها، فلات‌ها و دشت‌ها می‌شود، بر اقلیم محلی و سامانه‌های جوی تأثیر می‌گذارد و منجر به تفاوت‌های بارز در توزیع بارش می‌گردد. مطالعات اخیر بر شدت و فراوانی فزاینده‌ی رویدادهای بارش شدید تأکید کرده‌اند که تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و نوسانات جوی قرار دارند. با توجه به اینکه ایران به‌شدت در برابر تأثیرات شرایط جوی شدید، ازجمله سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها آسیب‌پذیر است، درک تغییرات مقدار بارش‌های شدید برای مدیریت مؤثر منابع آب و کاهش خطرات ناشی از بلایای طبیعی ضروری است. این مطالعه با استفاده از یک رویکرد همادی و به کارگیری ده مدلCMIP6 به پیش‌بینی تغییرات در مقادیر بارش شدید با دوره‌های بازگشت مختلف می‌پردازد. نتایج این تحقیق به‌منظور ارائه بینش‌هایی در مورد چالش‌های آب‌شناسی آینده ایران و کمک به درک بهتر تأثیرات تغییرات اقلیمی بر آب‌شناسی منطقه‌ای و اطلاع‌رسانی به سیاست‌گذاران در استراتژی‌های سازگاری با اقلیم خواهد بود.

۲-۲ داده‌های مورداستفاده

با توجه به عدم قطعیت مدل‌ها (Hawkins & Sutton, 2011) برای افزایش سطح قابلیت اطمینان، در این بررسی از روش همادی چند مدلی (MME[1]) برای پیش‌نگری اقلیمی استفاده شده است؛ بنابراین در این مطالعه از مجموعه داده‌های تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) و پیش‌نگری (۲۰۲۶-۲۰۵۰) بارش ۱۰ مدل از مدل‌های CMIP6[2] استفاده شده است که مشخصات مدل‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. با توسعه همه‌جانبه مدل‌های اقلیمی، همچنان این مدل‌ها عدم قطعیت زیادی دارند و برای کاهش این عدم قطعیت میانگین همادی چند مدل برای پیش‌نگری متغیرهای هواشناسی استفاده می‌شود؛ بنابراین انتخاب مناسب این مدل‌ها برای منطقه

[1] Multi Model Ensemble

[2] https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/

موردمطالعه با توجه معیارهای مختلف و افزایش تعداد مدل‌های دخالت داده شده در تحقیق از اهمیت بسیاری برخوردار است. در انتخاب مدل‌ها در این مطالعه، به ۳ مورد تفکیک افقی مدل، حساسیت اقلیمی و نتایج مطالعات پیشین توجه شده است.

۱. بر اساس تعریف تفکیک‌های افقی متنوع در مطالعه (Lin & Yu, 2022) که شامل تفکیک افقی بالا (کمتر از ۱۴ کیلومترمربع، ۳ مدل)، تفکیک افقی متوسط (۱۴ تا ۴۰ کیلومترمربع، ۵ مدل) و تفکیک افقی پایین (بیشتر از ۴۰ کیلومترمربع، ۲ مدل)، سعی شده است که ترکیبی از تمام تفکیک‌های افقی استفاده شود.

۲. حساسیت اقلیمی "Climate Model Sensitivity"به معنای تغییر دما در پاسخ به تغییر در ترکیب گازهای گلخانه‌ای در جو زمین است. این مفهوم در علوم اقلیمی به‌عنوان "حساسیت دما به افزایش دی‌اکسید کربن" نیز شناخته می‌شود. حساسیت اقلیمی معمولاً به دو نحو اندازه‌گیری می‌شود:

الف: (TCR - Transient Climate Response): این معیار نشان‌دهنده تغییر دما در دوران کوتاه‌مدت است که این دوره معمولاً به مدت چند دهه تا یک قرن است.

ب: (ECS - Equilibrium Climate Sensitivity): این شاخص نشان‌دهنده تغییر دمای مدل‌های اقلیمی به عدم تعادل بلندمدت دما در پاسخ به افزایش دی‌اکسید کربن است. درواقع، ECS نشان‌دهنده تغییر دمای نهایی و ثابتی است که بعد از دوره بلندمدت اتفاق می‌افتد.

مقادیر TCR و ECS برای هر مدل اقلیمی میزان حساسیت آن مدل به افزایش دی‌اکسید کربن را نمایش می‌دهند. افزایش دی‌اکسید کربن از انشعاب‌های انسانی مانند سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های صنعتی منشأ می‌گیرد و باعث افزایش دما و تغییرات اقلیمی جهانی می‌شود. حساسیت اقلیمی برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده و ارزیابی تأثیر افزایش دی‌اکسید کربن اهمیت دارد. به‌عنوان‌مثال، اگر مدل اقلیمی نشان دهد که افزایش دی‌اکسید کربن در جو زمین تغییرات دمایی بسیار بزرگی ایجاد می‌کند، حساسیت اقلیمی این مدل به افزایش دی‌اکسید کربن بالا است؛ به‌عبارت‌دیگر، مدل اقلیمی در این حالت بسیار حساس به تغییر دی‌اکسید کربن است. حساسیت اقلیمی مدل‌ها یک مشخصه مهم در ارتباط با توانایی مدل‌ها در پیش‌بینی تغییرات

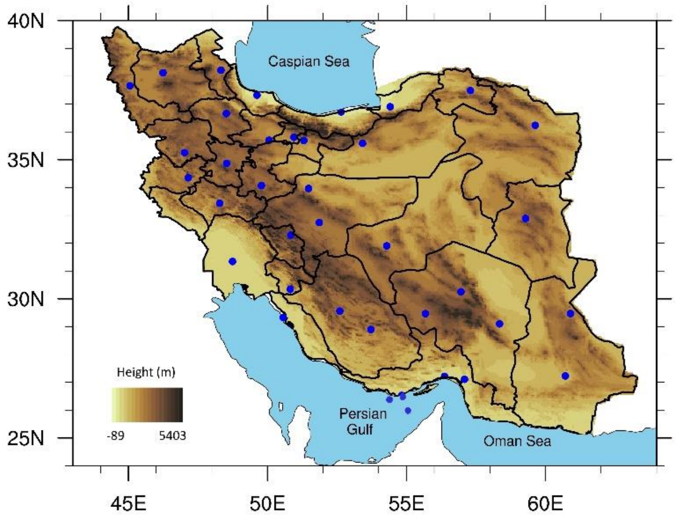
اقلیمی در آینده است. مدل‌هایی که به‌درستی حساسیت‌های اقلیمی را نمایان می‌کنند می‌توانند پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه دهند.

میل و همکاران (Meehl et al., 2020) به بررسی در مورد حساسیت اقلیم ترازمند (ECS) و پاسخ اقلیمی گذرا (TCR) در مدل‌های سیستم زمین CMIP6 پرداخته‌اند. مدل‌های مورد ذکر در جدول ۱ در متن مقاله مورد داوری، با تفکیک افقی و حساسیت اقلیم ترازمند مختلف (ECS) انتخاب شده‌اند. بر اساس مطالعه پیشین از نظر حساسیت اقلیمی، هفت مدل MPI-ESM1-2-HR، GFDL-ESM4، MRI-ESM2-0، INM-CM5-0، MIROC6، MPI-ESM1.2-LR و NorESM2-MM با حساسیت اقلیمی کم (با حساسیت اقلیمی کمتر از میانگین ۳۹ مدل موردمطالعه) و سه مدل EC-Earth3، EC-Earth3-Veg و CanESM5 با حساسیت اقلیمی زیاد (با حساسیت اقلیمی بیشتر از میانگین ۳۹ مدل موردمطالعه) انتخاب مناسبی برای کل مجموعه CMIP6 هستند. با توجه به حجم زیاد محاسبات سعی شده است انتخاب مناسبی از مدل‌ها با تفکیک افقی و حساسیت اقلیمی مختلف انجام شود.

۳. در انتخاب مدل‌های مذکور همچنین به نتایج مطالعات اخیر (Tang et al., 2021; Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021b; Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2022a; Zarrin et al., 2022c; Khansalari & Mohammadi, 2023) نیز توجه شده است.

همچنین به‌منظور ارزیابی و تعیین وزن هر یک از این مدل‌ها در این مطالعه از مجموعه داده‌های بارش دیدبانی شده و داده‌های تاریخی مدل‌های مورداستفاده CMIP6 در بازه زمانی مشترک (۱۹۹۰–۲۰۱۴) استفاده شده است. منطقه موردمطالعه (شکل ۱) کشور ایران واقع در جنوب‌غرب آسیا و تقریباً بین ۲۶ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۴ تا ۶۲ درجه طول جغرافیایی می‌باشد. موقعیت ایستگاه‌های همدیدی موردمطالعه برای تعیین دوره بازگشت و احتمال رخداد بارش‌های فرین تا اواسط قرن ۲۱ با ترکیب وزنی ۱۰ مدل مورداستفاده از مدل‌های CMIP6 و تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و کوهساری منطقه در شکل ۱ نشان داده شده است. انتخاب ایستگاه‌ها بر اساس وجود دوره آماری داده‌های دیدبانی ایستگاه‌ها در دوره

تاریخی مدل‌های CMIP6 (۲۰۱۴–۱۹۹۰) و حداکثر عدم وجود داده در ایستگاه مورد نظر برابر با ۱۰ درصد صورت گرفته است.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های همدیدی موردمطالعه به همراه کوهساری منطقه

Fig.1. Location of the synoptic stations studied, along with the mountainous areas of the region

جدول ۱- مشخصات مدل‌های CMIP6 مورداستفاده

Table 1 - Specifications of the CMIP6 models used

موسسه سازنده (**Manufacturing company**)	(تفکیک افقی و تعداد تراز قائم) **resolution and number of vertical levels**	نام مدل (**Model name**)	ردیف (**Row**)
مرکز داده‌های اقلیمی آلمان German Climate Data Center (Deutsches Klimarechenzentrum)	0.9375*0.9375 ۹۵ تراز، بالاترین تراز: ۰/۰۱ هکتوپاسکال 95 Elevation, The highest elevation: 0.01Hpa	MPI-ESM1-2-HR	1
اتحادیه‌ای از چندین شرکت تجاری (۱۲ کشور اروپایی) Consortium of Multiple Commercial Companies (12 European Countries)	0.7031*0.7031 ۹۱ تراز، بالاترین تراز: ۰/۰۱ هکتوپاسکال 91 Elevation, The highest elevation: 0.01Hpa	EC-Earth3	2
اتحادیه‌ای از چندین شرکت تجاری (۱۲ کشور اروپایی) Consortium of Multiple Commercial Companies (12	0.7031*0.7031 ۹۱ تراز، بالاترین تراز: ۰/۰۱ هکتوپاسکال 91 Elevation, The highest elevation: 0.01Hpa	EC-Earth3-Veg	3

			European Countries)
4	GFDL-ESM4	1*1 ۴۹ تراز، بالاترین تراز: ۰/۰۱ هکتوپاسکال 49 Elevation, The highest elevation: 0.01Hpa	اداره ملی اقیانوسی و جوی، آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیکی آمریکا National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA
5	MRI-ESM2-0	1.125* 1.125 ۸۰ تراز، بالاترین تراز: ۰/۰۱ هکتوپاسکال 80 Elevation, The highest elevation: 0.01Hpa	موسسه تحقیقات هواشناسی ژاپن Japan Meteorological Research Institute (MRI)
6	CanESM5	2.8125 *2.8125 ۴۹ تراز، بالاترین تراز: ۱ هکتوپاسکال 49 Elevation, The highest elevation: 1Hpa	مرکز کانادایی مدل‌سازی و تحلیل اقلیم، محیط‌زیست و تغییر اقلیم کانادا Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma), Environment and Climate Change Canada
7	INM-CM5-0	1.5 *2 ۷۳ تراز، بالاترین تراز سیگما: ۰/۰۰۰۲ 73 Elevation, The highest Sigma: 0.0002	موسسه ریاضیات عددی، آکادمی علوم روسیه Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences (INM RAS)
8	MIROC6	1.4063*1.4063 ۸۱ تراز، بالاترین تراز: ۰/۰۰۴ کتوپاسکال 81 Elevation, The highest elevation: 0.004 Kpa	علوم و فناوری‌های دریایی-زمینی آژانس ژاپن، موسسه تحقیقات جوی و اقیانوسی دانشگاه توکیو ژاپن، موسسه ملی مطالعات زیست‌محیطی ژاپن و مرکز RIKEN برای علوم محاسباتی ژاپن Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Atmosphere and Ocean Research Institute at the University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies (NIES), and RIKEN Center for Computational Science, Japan
9	MPI-ESM1.2-LR	1.875* 1.875 ۴۷ تراز، بالاترین تراز: ۰/۰۱ هکتوپاسکال 47 Elevation, The highest elevation: 0.01Hpa	موسسه هواشناسی ماکس پلانک آلمان Max Planck Institute for Meteorology of Germany
10	NorESM2-MM	0.9375 * 1.25 ۳۲ تراز، بالاترین تراز: ۳ هکتوپاسکال 32 Elevation, The highest elevation: 3 Hpa	اتحادیه مدل‌سازی اقلیم نروژ Norwegian Climate Modelling Consortium

۲-۳ روش مطالعه

الف: محاسبه شاخص‌های بارش فرین

میانگین بارش ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی بسیار کمتر از میانگین جهانی است. میزان بارش ۳۰۰ میلی متر در مناطق خشک به‌عنوان حداقل بارش برای کشت دیم عنوان شده است. بیش از دو سوم مساحت ایران دارای میانگین بارش سالانه کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر است، اما هسته‌های بارش بالای ۱۰۰۰ میلی‌متر در منطقه زاگرس و دامنه‌های شمالی البرز نیز وجود دارد (Alijani, O'Brien & Yarnal, 2008). با توجه به دامنه وسیع میانگین بارش در کشور انتخاب یک آستانه بارش فرین در کل کشور سؤال‌برانگیز است؛ بنابراین در این مطالعه، آستانه بارش فرین با استفاده از صدک‌ها، به روش (Zhai, Zhang, Wan & Pan, 2005) محاسبه می-شود. بر اساس این آستانه بارش فرین، چهار شاخص بارش فرین (جدول ۲) که توسط کارگروه ETCCDI[1] ارائه و توسط سازمان جهانی هواشناسی، کمیسیون اقلیم‌شناسی و توصیه‌های برنامه تغییر اقلیم و پیش‌بینی توسعه یافته است، مورداستفاده قرار می‌گیرد. این چهار شاخص فرین R95p، R95d، AEPI و R95pT به ترتیب مجموع بارش فرین بر حسب واحد میلی‌متر، تعداد روزهایی که در سال موردبررسی مقدار بارش در آن‌ها از آستانه بارش فرین آن سال بیشتر باشد، شدت مطلق بارش فرین بر حسب میلی‌متر بر روز (نسبت شاخص اول به شاخص دوم) و نسبت بارش فرین به بارش سالانه در روزهای بارانی (بارش روزانه بیش از یک میلی‌متر) بر حسب در صد، متغیرهای آماری اساسی هستند که بارش فرین را توصیف می‌کنند.

جدول ۲- معرفی مختصر چهار شاخص بارش فرین در این مطالعه (Tang et al., 2021)

Table 2 - Brief introduction of the four extreme precipitation indices used in this study (Tang et al., 2021**).**

شاخص (Index)	نام توصیفی شاخص (Descriptive Name of Index)	واحد (Unit)
R95p	Precipitation due to very wet days	mm
R95d	Extreme precipitation days	day

[1] Expert Team on Climate Change Detection and Indices

AEPI	Absolute intensity extreme precipitation Index	mm/d
R95pT	Extreme precipitation to total precipitation of very wet days	٪

برای ارزیابی کمّی ۱۰ مدل استفاده شده CMIP6، برای بازتولید تغییرات فضایی در شاخص‌های بارش فرین از طرح تیلور با بررسی همبستگی الگو، تفاوت ریشه میانگین مربعات (RMS) و نسبت انحراف معیار (Taylor, 2001) و برای ارزیابی کمّی مدل‌های CMIP6 برای بازتولید تغییرات زمانی تاریخی، از امتیاز مهارت تغییرپذیری بین‌سالانه توصیف‌شده توسط چن و همکاران (Chen, Jiang & Li, 2011) مطابق رابطه (۱) استفاده می‌شود.

رابطه (۱)

$$IVS = (\frac{STD_m}{STD_o} - \frac{STD_o}{STD_m})^2$$

که در این رابطه، STDm و STDo به ترتیب انحراف معیارهای بین‌سالانه شبیه‌سازی‌های مدل و مشاهدات هستند.

ب: رتبه‌بندی و وزن‌دهی هر مدل مورداستفاده از CMIP6

با توجه به قابلیت‌های شبیه‌سازی مکانی (نمودار تیلور) و زمانی (مقادیر IVS)، هر یک از شاخص‌های بارش فرین برای رتبه‌بندی مدل‌های CMIP6 استفاده می‌شوند (Tang et al., 2021; Khansalari & Mohammadi, 2023). بر این اساس، سنجه رتبه‌بندی کل MR (Jiang, Li, Xu & Li, 2015) به‌صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$MR = 1 - \frac{1}{nm}\sum_{i=1}^{n} rank_i \qquad (۲)$$

در این فرمول n تعداد شاخص‌های بارش فرین، m تعداد مدل‌ها و $rank_i$ رتبه مدل برای i امین شاخص بارش فرین است. هر چه عملکرد مدل بهتر باشد، رتبه مدل ($rank_i$) مقدار کمتری دارد. بنابراین؛ هر چه مقدار MR به ۱ نزدیک‌تر باشد، مهارت شبیه‌سازی بالاتر است. برای هر مدل CMIP6، دو مقدار MR (یکی با توجه به نمودار تیلور و دیگری بر اساس مقادیر IVS) به دست می‌آید. سپس برای هر مدل، S_i محاسبه می-شود که مجموع رتبه‌های دو مقدار MR است. ازاین‌رو وزن متناظر هر مدل به روش چن و همکاران (Chenهمکاران2011) در رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$R_i = \frac{\sum_{i=1}^{M} S_i}{S_i} \quad (۳)$$

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^{M} R_i} \quad (۴)$$

که در آن M تعداد کل مدل‌ها است. مدل‌هایی که مهارت‌های شبیه‌سازی بهتری دارند، مقادیر R_i بزرگ‌تری را دارا هستند. با استفاده از R_i، می‌توان وزن هر مدل (W_i) را با استفاده از معادله ۴ به دست آورد که درواقع W_i نرمال شده R_i است.

ریشه میانگین مربعات اختلاف (RMSD[1]) تغییرات پیش‌بینی شده، برای اندازه‌گیری عدم قطعیت پیش‌نگری استفاده می‌شود (Chen et al., 2011) اگر P مقدار پیش‌بینی مدل iام و W وزن متناظر با آن (محاسبه شده با استفاده از فرمول ۴) باشد، عدم قطعیت پیش‌نگری از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شود:

$$WMME = \frac{\sum_i W_i P_i}{\sum_i W_i} \quad (۵)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_i W_i (P_i - WMME)^2}{\sum_i W_i}} \quad (۶)$$

[1] Root-Mean-Square Difference

ج: دوره بازگشت

حداکثر بارش ۲۴ ساعته یکی از عناصر اساسی در مطالعات سیلاب‌ها و همچنین طراحی تأسیسات آبی می-باشد. بر این اساس، برای محاسبه آن در دوره بازگشت‌های مختلف انتخاب توزیع آماری مناسب ضروری است. در بررسی‌های اقلیمی سعی می‌شود داده‌های اندازه‌گیری و ثبت شده با توابع توزیع تئوری برازش داده شود تا بهترین تابعی که با داده‌ها مطابقت دارد به‌عنوان تابع توزیع احتمال برگزیده شود (Alizadeh, 2015). در این پژوهش برای دوره آماری ۲۵ ساله (دوره تاریخی ۲۰۱۴–۱۹۹۰ و دوره آتی ۲۰۵۰–۲۰۲۶) در ایستگاه‌های دیدبانی کشور ایران، مجموعه آمار به‌دست‌آمده از ترکیب وزنی مبتنی بر رتبه ۱۰ مدل از CMIP6، به کمک نرم‌افزار تحلیل فراوانی آب‌شناسیِ Easy Fit با چندین نوع توزیع آماری شامل توزیع‌های Exponential، Weibull، Normal، Lognormal(3p)، Lognormal، Gamma و Log-Pearson type3 به‌منظور برآورد بهترین توزیع، برازش داده شد. همچنین ارزیابی معنی‌داری توزیع‌های به دست آمده با استفاده از آزمون کای اسکوئر (Chi-Squared) انجام شد (Alijani & Afshar Manesh, 2015; Asadi & Akbari Azirani, 2021). در مطالعات مختلف با استفاده از آزمون‌های نکویی، میزان انطباق تابع توزیع با داده‌های مشاهداتی تعیین می‌گردد. اگر میزان تطابق در حد قابل قبولی بود، آن توزیع به‌عنوان توزیع برگزیده پذیرفته می‌شود .لازم به ذکر است که هیچ توزیع آماری نمی‌تواند دقیقاً بر داده‌های مشاهده‌ای برازش خوبی داشته باشد و انتخاب یکی به‌عنوان بهترین توزیع با توجه به مقایسه نسبت به سایر توزیع‌ها است (Shahabfar & Qiyami, 2001).

رابطه آزمون کای اسکوئر به‌صورت رابطه (۷) می‌باشد:

$$k^2 = \sum \frac{(p_{ei} - p_{oi})^2}{p_{ei}} \quad (۷)$$

که k^2 تابعی از درجه آزادی و درصد اطمینان و p_{ei} و p_{oi} به ترتیب مقدار بارش تخمین زده شده و مشاهداتی می‌باشند. لازم به ذکر است در این پژوهش درصد اطمینان ۹۵ ٪ در نظر گرفته شد. برای محاسبه

دوره بازگشت بارش‌ها، از نرم‌افزار Hyfran-plus استفاده شد. دوره بازگشت به برآورد احتمال روی‌دادن یک پدیده مانند سیل یا تغییرات دبی رودخانه گفته می‌شود. معمولاً برآورد دوره بازگشت بر پایه اندازه‌گیری آماری داده‌های تاریخی به‌منظور دست‌یابی به میانگین زمان تکرار پدیده در یک دوره زمانی است. دوره بازگشت تعداد سال‌هایی است که به‌طور متوسط بین وقوع دو حادثه مشابه وجود دارد. اگر دوره بازگشت T (سال) و احتمال وقوع P باشد، رابطه (۸) است (Alizadeh, 2015).

(۸)

$$T = \frac{1}{P}$$

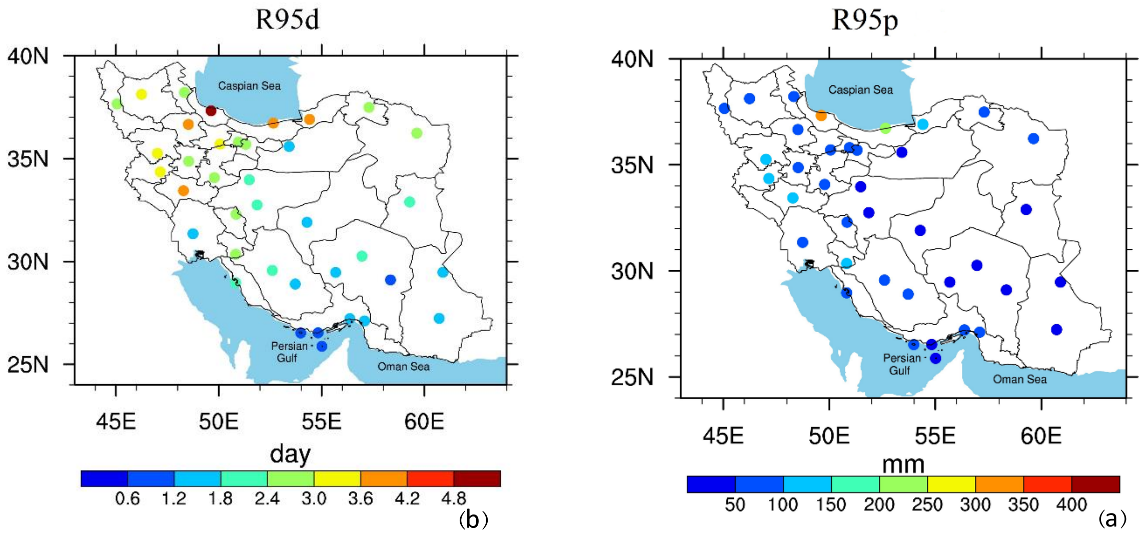
بنابراین احتمال ۱۰ درصد یعنی دوره بازگشت ۱۰ سال (هر ۱۰ سال یکبار) و یا احتمال ۹۸ درصد یعنی دوره بازگشت ۱/۰۲ سال (در هر ۱۰۲ سال ۱۰۰ بار).

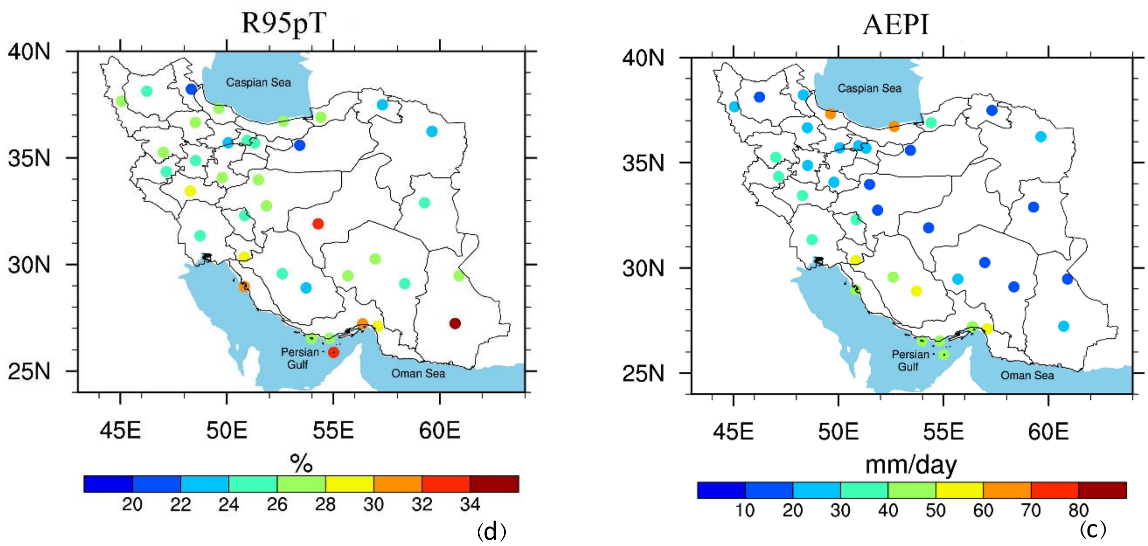
۳- نتایج و بحث

۳-۱- توزیع مکانی میانگین چهار شاخص بارش فرین در دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۹۰

شکل ۲ توزیع مکانی میانگین سالانه چهار شاخص بارش فرین در ایران را که در بخش روش کار به آن‌ها اشاره شد، طی دوره تاریخی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۲(a)، شاخص R95p همراه با کوهساری ایران تغییر می‌کند. بیشترین مقادیر شاخص R95p در سواحل دریای خزر به‌ویژه نواحی غربی و جنوبی مشاهده می‌شود که بارش فرین بیش از ۴۰۰ میلی‌متر است. همچنین میزان بارش فرین در دامنه‌های غربی رشته‌کوه زاگرس و سواحل شرقی دریای خزر بیش از ۱۰۰ میلی‌متر است. در حقیقت بیشترین رخداد بارش فرین در بادسوی دو رشته‌کوه مهم ایران (البرز و زاگرس) رخ می‌دهد. در بادسوی این رشته‌کوه‌های مهم در ایران که محل ورود سامانه‌های جوّی به کشور است با صعود بسته هوا در شیب این رشته‌کوه‌ها فرآیند سرد شدن و اشباع بهتر رخ می‌دهد و منجر به تشکیل ابرهای همرفتی و رخداد بارش بیشتر می‌گردد. همچنین طبق نتایج زرین و داداشی رودباری (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2022b) با کاهش عرض

جغرافیایی از شمال به جنوب و کاهش ارتفاعات از غرب به شرق رخداد بارش کاهش می‌یابد. در شکل (۲b) ، مقادیر شاخص R95d نشان داده شده است. بر این اساس میانگین سالانه تعداد روزهای همراه با بارش فرین، در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز و شمال غرب و مناطقی از غرب ایران بیشتر از ۳ روز است. بیشترین بزرگی این شاخص (بیش از ۵ روز) در امتداد سواحل غربی و جنوبی دریای خزر در دوره تاریخی ۱۹۹۰–۲۰۱۴ مشاهده شده است. بیشترین مقدار شدت بارش فرین نیز در این دوره آماری در سواحل جنوبی و غربی دریای خزر و پس از آن در منطقی از جنوب و جنوب غرب کشور (بیش از ۵۰ میلی‌متر بر روز) حاصل شده است (شکل ۲c). همچنین نسبت بارش فرین به بارش سالانه در روزهای بارانی (بارش روزانه بیش از یک میلی‌متر) بر حسب در صد (شکل ۲d)، در بیشتر مناطق کشور بیش از ۲۰ درصد است.





شکل ۲- توزیع فضایی میانگین سالانه شاخص‌های بارش فرین برای دوره تاریخی: ۲۰۱۴-۱۹۹۰، a) R95p، b) R95d، c) AEPI، d) R95pT

Fig. 2. Spatial distribution of the annual average of the extreme precipitation indices for the historical period: 1990-2014. a) R95p, b) R95d, c) AEPI, d) R95pT

۳-۲- وزن‌دهی مدل‌های مورداستفاده CMIP6 بر اساس رتبه‌بندی مکانی و زمانی

در جدول ۳ رتبه‌بندی مکانی ۱۰ مدل مورداستفاده CMIP6 برای هر یک از چهار شاخص بارش فرین با توجه به سه جنبه نمودار تیلور، شامل همبستگی الگو، نسبت انحراف استاندارد فضایی و ریشه میانگین مربعات اختلاف نرمال شده متمرکز و همچنین رتبه‌بندی زمانی بر اساس امتیاز IVS برای اندازه‌گیری مقدار شباهت تغییرپذیری بین‌سالانه ارائه شده است.

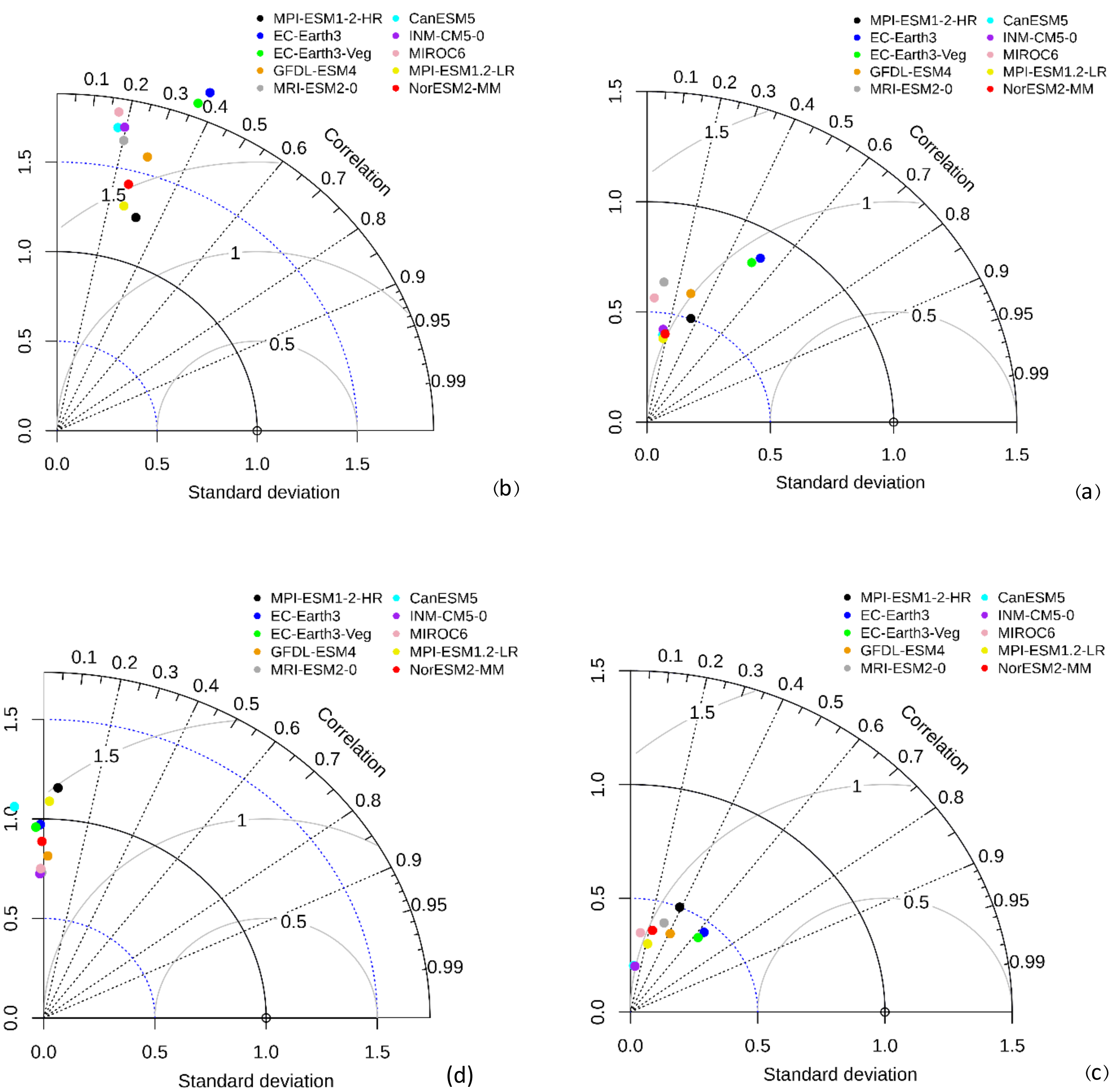
جدول ۳- مقادیر آماره‌های تیلور و امتیاز IVS، برای هر شاخص بارش فرین، رتبه‌ها و وزن‌های مربوط به ۱۰ مدل مورداستفاده CMIP6 (جدول ۱) با توجه به عملکرد جامع آن‌ها با در نظر گرفتن نمودار تیلور و تغییرپذیری بین‌سالانه در کشور ایران برای دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۹۰. خانه‌های قرمزرنگ نشان‌دهنده مدل با وزن بزرگ‌تر از ارزش مدل‌های هم‌وزن (۰/۱) است.

Table 3 - Values of the Taylor statistics and IVS scores for each extreme precipitation index, along with the rankings and weights corresponding to the 10 CMIP6 models used (Table 1), based on their overall performance considering the Taylor diagram and interannual variability in Iran for the historical period 1990-2014. Red cells indicate models with weights greater than the value of equally weighted models (0.1).

10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	**Model number**
0.4069	0.3848	0.5644	0.4261	0.4010	0.6390	0.6097	0.8388	0.8742	0.5026	**R95p_STD_ratio**
1.4213	1.2986	1.8063	1.7281	1.7199	1.6546	1.5942	1.9598	2.0365	1.2541	**R95d_STD_ratio**
0.3693	0.3075	0.3508	0.2025	0.2044	0.4134	0.3741	0.4218	0.4543	0.4999	**AEPI_STD_ratio**
0.8873	1.0892	0.7506	0.7247	1.0701	0.7304	0.8144	0.9596	0.9721	1.1578	**R95pT_STD_ratio**
1.0092	1.0091	1.1220	1.0247	1.0166	1.1270	1.0079	0.9246	0.9188	0.9468	**R95p_CNRMSE**
1.5181	1.4202	1.9085	1.8187	1.8296	1.7516	1.6234	1.8516	1.9017	1.3355	**R95d_CNRMSE**
0.9891	1.0039	1.0200	1.0065	1.0366	0.9584	0.9168	0.8128	0.8082	0.9493	**AEPI_CNRMSE**
1.3425	1.4598	1.2608	1.2484	1.5474	1.2457	1.2752	1.4107	1.4038	1.4868	**R95pT_CNRMSE**
0.1799	0.1679	0.0522	0.1535	0.1578	0.1075	0.2913	0.5056	0.5259	0.3538	**R95p_R**
0.2511	0.2573	0.1711	0.1957	0.1768	0.2017	0.2836	0.3597	0.3753	0.3141	**R95d_R**
0.2343	0.2189	0.1113	0.0863	0.0616	0.3190	0.4128	0.6299	0.6361	0.3872	**AEPI_R**
-0.0091	0.0235	0.0182	0.0238	0.1232	0.0132	0.0221	0.0368	0.0158	0.0554	**R95pT_R**
2.85	3.09	1.76	4.19	2.95	1.32	1.19	0.71	0.87	1.37	**R95p_IVS**
1.09	0.57	1.86	2.04	1.29	1.42	0.90	1.16	1.30	0.53	**R95d_IVS**
11.84	6.35	5.10	10.67	13.58	4.11	4.27	7.52	6.48	2.44	**AEPI_IVS**
0.27	0.35	0.57	0.90	0.36	0.82	0.39	0.39	0.46	0.30	**R95pT_IVS**
0.6000	0.5750	0.1250	0.1500	0.0750	0.4500	0.7000	0.5770	0.7500	0.6750	**MR_Taylor**
0.4750	0.5250	0.3250	0.0500	0.3000	0.4250	0.6500	0.5500	0.4500	0.7750	**MR_IVS**
4	5	9	8	10	7	2	5	1	3	**Rank of Taylor**
5	4	8	10	9	7	2	3	6	1	**Rank of IVS**
9	9	17	18	19	14	4	8	7	4	**S**
12.1111	12.1111	6.4118	6.0556	5.7368	7.7857	27.2500	13.6250	15.5714	27.2500	**R**
0.0904	0.0904	0.0479	0.0452	0.0428	0.0581	0.2035	0.1017	0.1163	0.2035	**W**

در شکل ۳ نمودار تیلور چهار شاخص فرین برای ۱۰ مدل مورداستفاده نشان داده شده است. در این نمودار مقادیر ضریب همبستگی با امتداد شعاع دایره روی قوس ربع دایره، مقادیر انحراف معیار بر روی شعاع ربع دایره و مقادیر RMSD بر روی شعاع دوایر متحدالمرکز با مرکز دایره توخالی مشخص می‌شوند. همچنین مقادیر دقیق هر آماره در این جدول نشان داده شده است. با توجه به مقادیر MR فضایی و زمانی هرچه مقدار MR به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده مهارت بیشتر شبیه‌سازی مدل برای شاخص‌های بارش فرین است. بر این اساس مدل EC-Earth3 با MR_taylor برابر با ۰/۷۵ (جدول ۳) و با تفکیک افقی ۰/۷۰۳۱۰×۰/۷۰۳۱۰ و ۹۱ تراز (جدول ۱) بهترین مهارت در شبیه سازی الگوی فضایی شاخص‌های بارش فرین را دارد که مدل مذکور، بیشترین تفکیک افقی شبیه‌سازی را در بین ۱۰ مدل مورداستفاده داراست. از دیدگاه شبیه‌سازی زمانی مدل MPI-ESM1-2-HR و GFDL-ESM4 به ترتیب با MR_IVS برابر با ۰/۷۷۵۰ و ۰/۶۵ (جدول ۳)

مناسب‌تر از سایر مدل‌های موردمطالعه هستند. زرین و داداشی رودباری (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021b) نیز در پیش‌نگری بارش فرین با پنج مدل CMIP6 که سه مدل آن مشترک با پژوهش حاضر است مدل MPI-ESM1-2-HR را بهترین مدل معرفی نموده‌اند که در تطابق با نتایج مطالعه حاضر می‌باشد.



شکل ۳- نمودار تیلور چهار شاخص بارش فرین برای ۱۰ مدل مورداستفاده CMIP6 برای دوره تاریخی ۱۹۹۰-۲۰۱۴، a) R95p، b) R95d، c) AEPI، d) R95pT

Fig. 3. Taylor diagram of the four extreme precipitation indices for the 10 CMIP6 models used for the historical period 1990-2014. a) R95p, b) R95d, c) AEPI, d) R95pT

پس از محاسبه رتبه ۱۰ مدلِ CMIP6 توسط MR ها بر اساس نمودار تیلور و IVS، سپس وزن متناظر آن‌ها با استفاده از رابطه ۴، محاسبه شد. بر این اساس وزن مربوط به هر مدل در جدول ۳ ارائه شده است که در آن خانه‌های قرمزرنگ نشان می‌دهد که وزن مدل‌های مشخص شده، بزرگ‌تر از مقدار وزن مدل‌ها در حالتی است که وزن هر یک از ۱۰ مدل برابر در نظر گرفته می‌شود (۰/۱). به بیان دیگر مدل‌های مشخص شده تأثیر بیشتری در پیش‌نگری احتمالی آینده خواهند داشت.

۳-۳- نتایج محاسبه دوره بازگشت بارش‌های فرین

با استفاده از آزمون نکویی برازش کای اسکوئر تابع توزیع احتمالاتی بیشینه بارش ۲۴ ساعته در دوره‌ی تاریخی و دوره آتی با سناریوهای مختلف تغییر اقلیم (بر اساس کمترین خطای آزمون)، توزیع‌های ارائه شده در جدول ۴ برازش بهتری در مقایسه با سایر توزیع‌های مورد آزمون در ایستگاه‌های موردمطالعه را نشان داد و به‌عنوان بهترین توزیع آماری منطبق بر داده‌ها در ایستگاه‌های مورد نظر برای ادامه کار انتخاب شد.

جدول ۴- توزیع‌های منتخب در ایستگاه‌های موردمطالعه

Table 4 - Selected distributions at the studied stations

تابع توزیع **Distribution Function**	ایستگاه **Station**
Log-Pearson type 3	اردبیل، تبریز، ارومیه، رشت، زنجان، سنندج، قزوین، همدان، کرمانشاه، بابلسر، کرج، تهران، اراک، خرم‌آباد، گرگان، سمنان، اصفهان، کاشان، شهرکرد، دوگنبدان، اهواز، مشهد، یزد، کرمان، سیرجان، بم، شیراز، بوشهر، بندرعباس، میناب، زاهدان، ایرانشهر
gamma	بجنورد، بیرجند، فسا
Exponential	بندرلنگه، کیش
Weibull	ابوموسی

با توجه به تعداد زیاد نمودارها و جداول، درجه مناسب بودن و شاخص آماری آزمون کای اسکوئر در ایستگاه اردبیل به‌عنوان نمونه از تابع توزیع با بیشترین عضو (Log-Pearson type 3)، در دوره تاریخی و آینده

(سه سناریو) در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس نتایج مندرج در این جدول، توزیع لوگ پیرسون نوع ۳ برای ایستگاه اردبیل در دوره تاریخی (۱۹۹۰–۲۰۱۴) و آینده (۲۰۲۶–۲۰۵۰) برای هر سه سناریو به دلیل کمترین مقدار خطا و مجموع کمترین رتبه انتخاب شد. در جدول ۵ ستون اول انواع توابع توزیع را نشان می‌دهد که در مطالعات آب‌شناسی به‌صورت‌های گوناگون با برازش داده‌ها بر آن‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرند (Alizadeh, 2015). درجه مناسب بودن، رتبه هر توزیع را پس از برازش بر روی داده‌ها نشان می‌دهد و شاخص آماری، میزان خطا در برآورد توزیع را نشان می‌دهد که هرچه کوچک‌تر باشد مقدار خطا کمتر خواهد بود. بر این اساس با توجه به جدول ۱، طبق مقادیر شاخص آماری، کمترین خطا در دوره تاریخی و در دوره آینده و در هر سه سناریو مربوط به تابع توزیع Log-Pearson 3 است.

جدول ۵- درجه مناسب بودن و شاخص آماری آزمون کای اسکوئر در ایستگاه اردبیل در دوره تاریخی و آینده (سه سناریو)

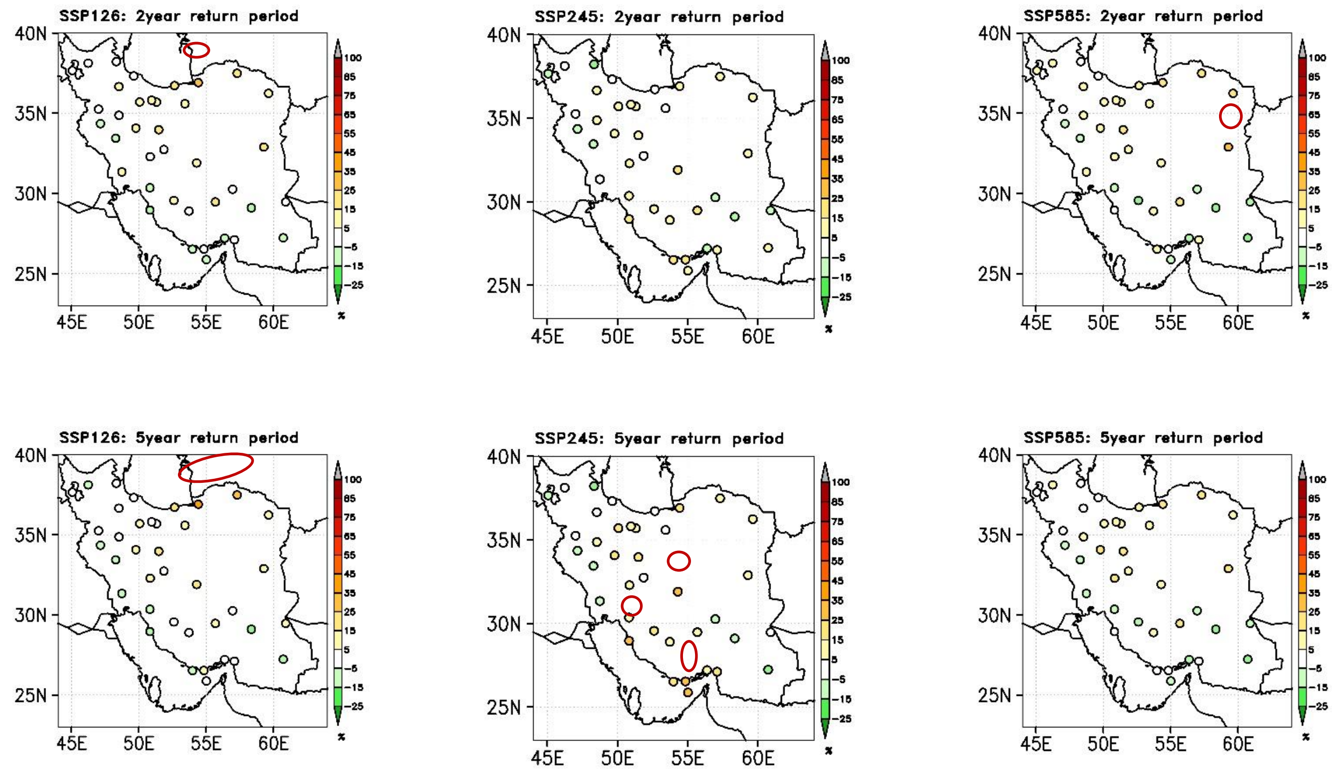
Table 5 - Goodness of fit and Chi-square statistical index for the Ardabil station during the historical and future periods (three scenarios).

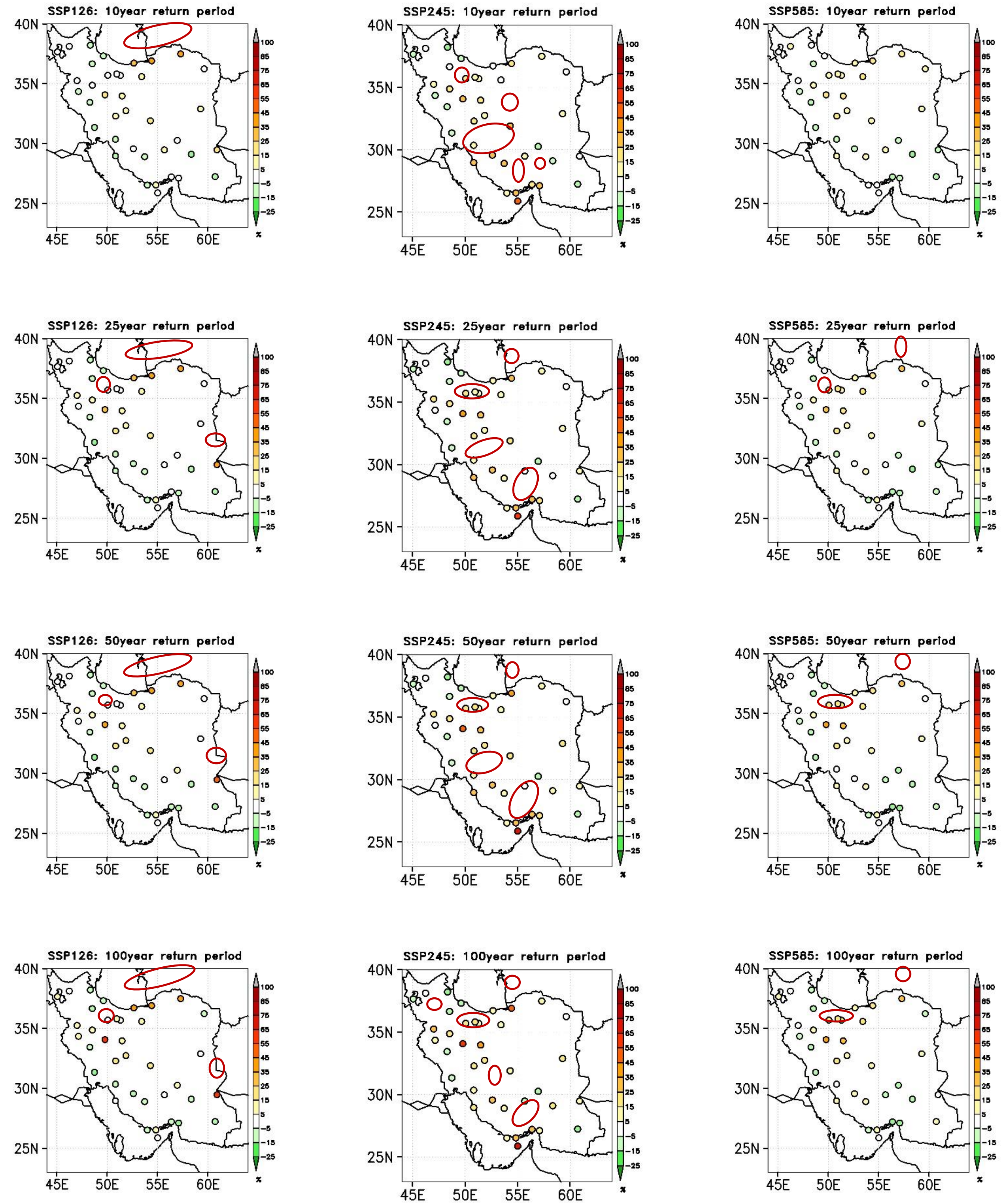
دوره آینده 2026–2050 Future period SSP5-8.5		SSP2-4.5		SSP1-2.6		دوره تاریخی *1990*–2014 Historical period		تابع توزیع Distribution Function
شاخص آماری Statistical Index	درجه مناسب بودن Goodness of Fit	شاخص آماری Statistical Index	درجه مناسب بودن Goodness of Fit	شاخص آماری Statistical Index	درجه مناسب بودن Goodness of Fit	شاخص آماری Statistical Index	درجه مناسب بودن Goodness of Fit	
3.67	1	2.52	1	1.71	1	5.03	1	Log-Pearson 3
4.13	2	3.12	2	2.36	2	7.51	2	Lognormal (3P)
8.13	4	10.81	4	6.02	4	7.97	3	Lognormal
7.55	3	8.98	3	3.34	3	11.09	4	Gamma (3P)
22.55	7	27.1	7	17.23	7	12.03	5	Weibull
18.60	5	25.48	6	6.92	5	17.11	6	Weibull (3P)
21.26	6	20.87	5	13.92	6	28.20	7	Gamma
23.61	8	31.32	8	24.29	8	41.03	8	Normal
29.72	9	54.83	9	26.17	9	59.03	9	Exponential (2P)
185.72	10	299.94	10	221.43	10	232.78	10	Exponential

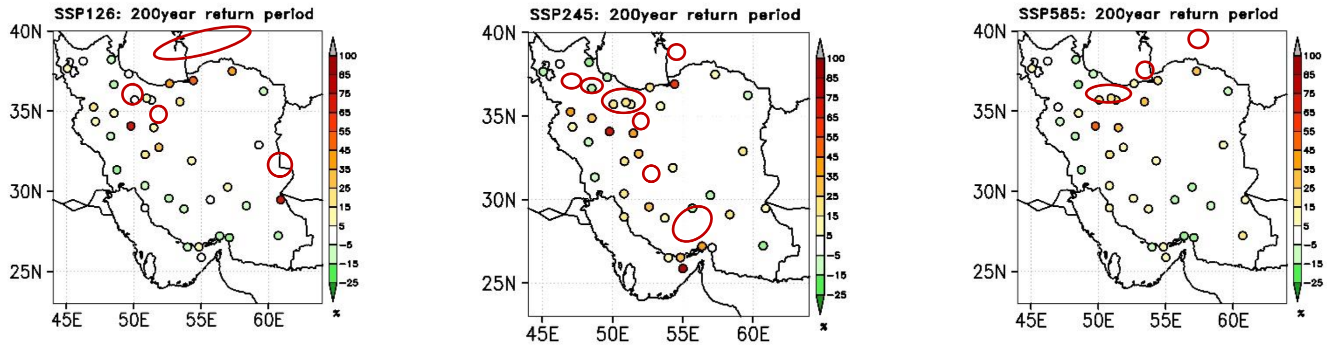
در این مرحله از مطالعه با توجه به تعریف دوره بازگشت که فاصله زمانی بین رویدادهای با بزرگی یکسان است، بارش‌های فرین در توزیع‌های منتخب با استفاده از نرم‌افزار Hyfran-plus در هر ایستگاه و در دوره‌ی

تاریخی و دوره آینده در هر سه سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با دوره بازگشت‌های مختلف (۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله) محاسبه شد. با توجه به هدف اصلی این پژوهش و همچنین انبوه اطلاعات و توزیع‌های مختلف مقدار بارش فرین پیش‌نگری شده نسبت به دوره تاریخی در شکل ۴، درصد تغییرات مقدار بارش فرین پیش‌نگری شده نسبت به مقدار بارش فرین در دوره تاریخی در هر یک از ایستگاه‌های موردمطالعه در هر سه سناریو و همه دوره بازگشت‌ها ترسیم شده است. همچنین در این شکل، در هر دوره و سناریو که مقدار این کمیت بیشتر از ۲۵ درصد باشد، ایستگاه مورد نظر با خط قرمزرنگ مشخص شده است و در شکل ۵ نمودار تغییرات این کمیت در دوره بازگشت‌های مختلف برای ایستگاه مشخص شده ارائه شده است. با توجه به شکل ۴ در سناریو خوش‌بینانه در سواحل شرقی دریای خزر و ایستگاه بجنورد در شمال‌شرق کشور، ایستگاه‌های اراک و اصفهان از مرکز کشور و همچنین ایستگاه زاهدان در جنوب‌شرق کشور بیشترین درصد افزایش مقدار بارش فرین پیش‌نگری شده نسبت به دوره تاریخی مشاهده می‌شود. در مطالعه زرین و داداشی رودباری (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2022a) بیشینه افزایش روزهای همراه با بارش سنگین در سواحل دریای خزر عنوان شده است و همچنین زرین و داداشی رودباری (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2022b) نشان دادند که بیشینه بارش محتمل در دوره‌های بازگشت ۱ تا ۱۵ ساله در سواحل شمالی کشور اتفاق می‌افتد. بررسی دقیق‌تر ۶ ایستگاه ذکر شده (شکل ۵a) نشان می‌دهد که بیشترین شیب درصد افزایش مقدار بارش فرین پیش‌نگری شده نسبت به مقدار بارش فرین در دوره تاریخی مربوط به ایستگاه‌های زاهدان و اراک است که در دوره بازگشت ۲۰۰ ساله این درصد افزایش به بیش از ۷۰ درصد می‌رسد. در سناریو میانه (شکل ۴)، نسبت به دو سناریو دیگر در حالت کلی درصد افزایش مقدار بارش فرین پیش‌نگری شده نسبت به مقدار بارش فرین در دوره تاریخی بیشتر است. بیشترین مقادیر افزایش در رشته‌کوه زاگرس و سواحل جنوبی کشور (سنندج، همدان، اراک، کاشان، اصفهان، شیراز، فسا، میناب، بوشهر، بندرعباس، بندرلنگه، ابوموسی) و گرگان (شمال‌شرق کشور) واقع هستند. بر اساس شکل ۵(b) ، بیشترین شیب درصد افزایش مقدار بارش فرین پیش‌نگری شده نسبت به مقدار بارش فرین در دوره تاریخی مربوط به ایستگاه‌های ابوموسی و اراک است که در دوره بازگشت ۲۰۰ ساله این درصد افزایش به‌ترتیب به حدود ۸۰ و ۶۸ درصد می‌رسد. در ایستگاه‌های جنوبی کشور (بندرعباس، بندرلنگه، بوشهر و میناب) از دوره

بازگشت ۱۰ سال به بعد شیب درصد افزایش مقدار بارش فرین پیش‌نگری شده در دوره بازگشت‌های طولانی‌تر کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل ۴ مشخص است کمترین در صد افزایش مقدار بارش فرین پیش‌نگری شده نسبت به مقدار بارش فرین در دوره تاریخی، در سناریو بدبینانه (SSP5-8.5) حاصل شده است. بیشینه این افزایش مقدار بارش فرین در دوره آینده (۲۰۲۶–۲۰۵۰) مربوط به ایستگاه‌های بجنورد، بیرجند و ایستگاه‌های اراک، کاشان و سمنان واقع در مناطق مرکزی کشور است. در این سناریو شیب تغییرات (شکل 5c) نسبت به سایر سناریوها نیز کمتر است و بیشترین افزایش مربوط به ایستگاه اراک است که در دوره بازگشت ۲۰۰ ساله درصد افزایش مقدار بارش فرین نسبت به دوره تاریخی به حدود ۵۰ درصد می‌رسد.

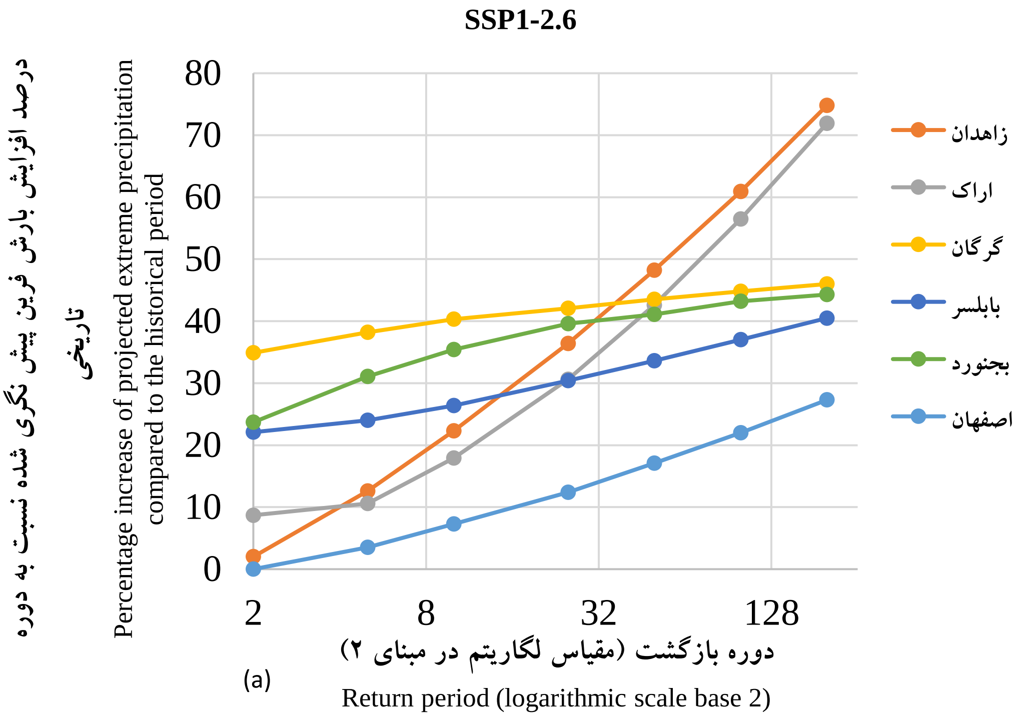


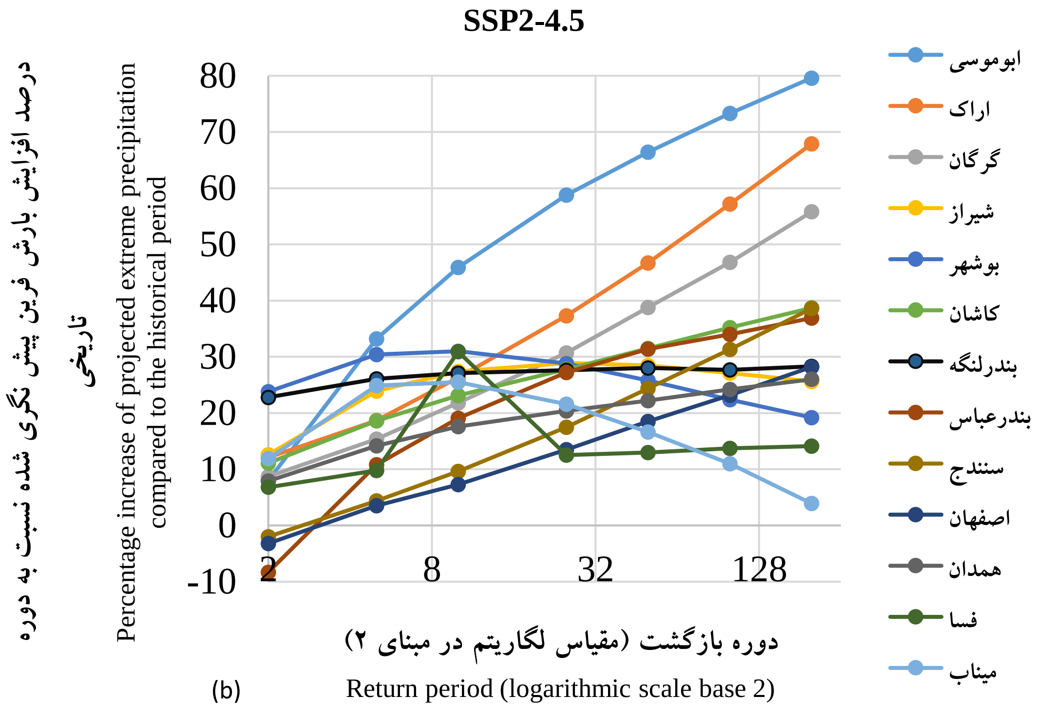

SSP126: 10year return period
SSP245: 10year return period
SSP585: 10year return period
SSP126: 25year return period
SSP245: 25year return period
SSP585: 25year return period
SSP126: 50year return period
SSP245: 50year return period
SSP585: 50year return period
SSP126: 100year return period
SSP245: 100year return period
SSP585: 100year return period
40N
35N
30N
25N
45E
50E
55E
60E
100
85
75
65
55
45
35
25
15
5
-5
-15
-25
%

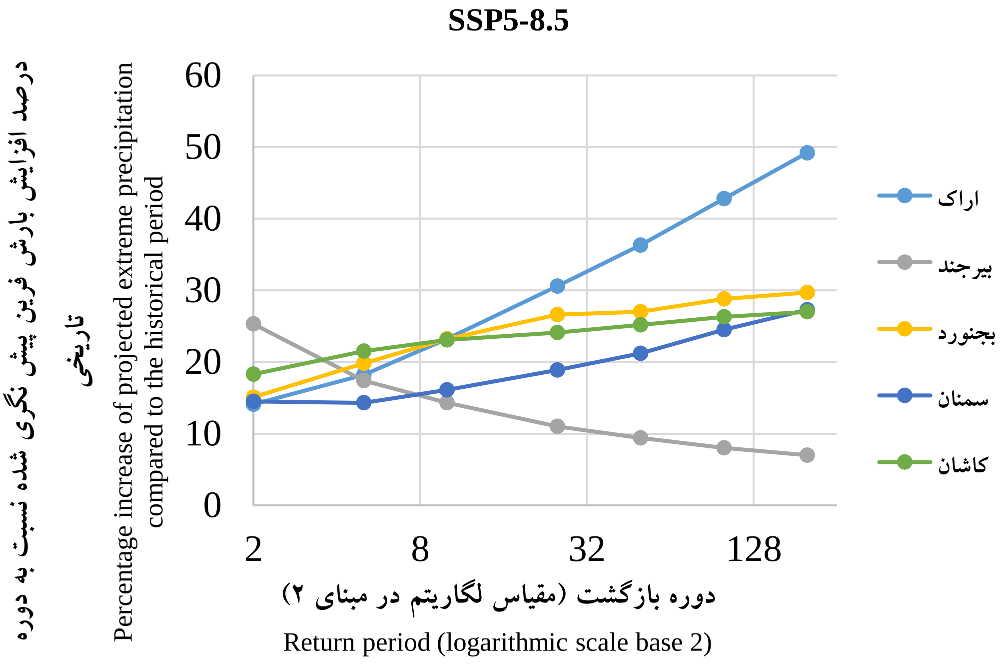


شکل ۴- درصد تغییرات مقدار بارش فرین پیش‌نگری شده نسبت به مقدار بارش فرین در دوره تاریخی در هر یک از ایستگاه‌های موردمطالعه در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال، ایستگاه‌های مشخص شده با خط بسته قرمزرنگ دارای درصد افزایش بیش از ۲۵ درصد هستند.

Fig. 4. Percentage changes in the projected extreme precipitation amounts compared to historical extreme precipitation at each of the studied stations under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios for return periods of 2, 5, 10, 25, 50, 100, and 200 years. Stations marked with a solid red line indicate a percentage increase of more than 25%.


SSP1-2.6
درصد افزایش بارش فرین پیش نگری شده نسبت به دوره تاریخی
Percentage increase of projected extreme precipitation compared to the historical period
0
10
20
30
40
50
60
70
80
2
8
32
128
دوره بازگشت (مقیاس لگاریتم در مبنای ۲)
Return period (logarithmic scale base 2)
(a)
زاهدان
اراک
گرگان
بابلسر
بجنورد
اصفهان


SSP2-4.5
درصد افزایش بارش فرین پیش نگری شده نسبت به دوره تاریخی
Percentage increase of projected extreme precipitation compared to the historical period
-10
0
10
20
30
40
50
60
70
80
2
8
32
128
دوره بازگشت (مقیاس لگاریتم در مبنای ۲)
Return period (logarithmic scale base 2)
(b)
ابوموسی
اراک
گرگان
شیراز
بوشهر
کاشان
بندرلنگه
بندرعباس
سنندج
اصفهان
همدان
فسا
میناب



(d)

شکل ۵- نمودار تغییرات کمیت ترسیم شده در شکل ۴ در دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال و در سناریو a) SSP1-2.6، b) SSP2-4.5، c) SSP5-8.5 برای ایستگاه‌های مشخص شده در شکل ۴.

Fig. 5. Chart of changes in the quantity plotted in Figure 4 for return periods of 2, 5, 10, 25, 50, 100, and 200 years under scenarios a) SSP1-2.6, b) SSP2-4.5, and c) SSP5-8.5 for the stations indicated in Figure 4.

۴-نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر دوره بازگشت و احتمال رخداد بارش‌های فرین تا اواسط قرن ۲۱ با ترکیب وزنی ۱۰ مدل مورداستفاده از مدل‌های CMIP6 و تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 موردبررسی و تحلیل قرار گرفت. با استفاده از آزمون نکویی برازش کای اسکوئر تابع توزیع احتمالاتی بیشینه بارش ۲۴ ساعته در دوره‌ی تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) و دوره آینده (۲۰۲۶-۲۰۵۰) تحت سناریوهای تغییر اقلیم خوش-بینانه، میانه و بدبینانه (بر اساس کمترین خطای آزمون)، بهترین توزیع آماری منطبق بر داده‌ها برای هر یک از

ایستگاه‌های موردمطالعه انتخاب شد که در ۸۴ درصد ایستگاه‌ها توزیع log-Pearson type3 به‌عنوان بهترین تابع توزیع انتخاب گردید. نتایج بررسی بارش‌های فرین حاصل در هر ایستگاه و مقایسه آن‌ها در دوره آینده و تاریخی نشان می‌دهد درصد تغییرات مقدار بارش فرین پیش‌نگری شده نسبت به مقدار بارش فرین در دوره تاریخی، در سناریو SSP2-4.5، نسبت به دو سناریو خوش‌بینانه و بدبینانه بیشتر است و در سناریو بدبینانه نسبت به سایر سناریوها کمترین درصد تغییرات مشاهده می‌شود. همچنین در سناریو خوش‌بینانه (SSP1-2.6)، بیشترین درصد افزایش مقدار بارش فرین پیش‌نگری شده نسبت به دوره تاریخی در ایستگاه گرگان و بابلسر واقع در سواحل شرقی دریای خزر و ایستگاه بجنورد در شمال‌شرق کشور و ایستگاه‌های اراک و اصفهان واقع در مرکز کشور و همچنین ایستگاه زاهدان در جنوب‌شرق کشور مشاهده می‌شود که نتایج بیشینه مقدار بارش فرین در سواحل دریای خزر در تطابق با مطالعات زرین و داداشی رودباری (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2022a; 2022b) است. در مطالعه زرین و داداشی رودباری (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2022b) بیشینه شدت بارش در دوره‌های بازگشت ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ ساله در سواحل جنوبی کشور، زاگرس مرتفع و سواحل دریای خزر عنوان شده است؛ که در مقایسه با مطالعه حاضر بیشینه افزایش بارش فرین در سواحل جنوبی کشور در دوره بازگشت‌های طولانی‌تر مشاهده می‌شود. در سناریو خوش‌بینانه (SSP1-2.6)، بیشترین شیب درصد افزایش مقدار بارش فرین پیش‌نگری شده نسبت به مقدار بارش فرین در دوره تاریخی مربوط به ایستگاه‌های زاهدان و اراک است که در دوره بازگشت ۲۰۰ ساله این درصد افزایش به بیش از ۷۰ درصد می‌رسد. در سناریو میانه (SSP2-4.5)، بیشترین مقادیر افزایش در ایستگاه‌های سنندج، همدان، اراک، کاشان، اصفهان، شیراز، فسا و برخی مناطق سواحل جنوبی کشور شامل ایستگاه‌های میناب، بوشهر، بندرعباس، بندرلنگه، ابوموسی و نیز در گرگان واقع در شمال‌شرق کشور مشاهده می‌شود. همچنین در این در سناریو، بیشترین شیب درصد افزایش مقدار بارش فرین پیش‌نگری شده نسبت به مقدار بارش فرین در دوره تاریخی مربوط به ایستگاه‌های ابوموسی و اراک است که در دوره بازگشت ۲۰۰ ساله این درصد افزایش به ترتیب به حدود ۸۰ و ۶۸ درصد می‌رسد. در سناریو میانه (SSP2-4.5)، در ایستگاه‌های سواحل جنوبی کشور شامل بندرعباس، بندرلنگه، بوشهر و میناب از دوره بازگشت ۱۰ سال به بعد شیب درصد افزایش مقدار بارش فرین پیش‌نگری شده در دوره بازگشت‌های طولانی‌تر کاهش می‌یابد. در سناریو

بدبینانه (SSP5-8.5)، بیشینه افزایش مقدار بارش فرین مربوط به ایستگاه‌های بجنورد، بیرجند، اراک، کاشان و سمنان است. در این سناریو شیب تغییرات نسبت به سایر سناریوها نیز کمتر است و بیشترین افزایش مربوط به ایستگاه اراک است که در دوره بازگشت ۲۰۰ ساله درصد افزایش مقدار بارش فرین نسبت به دوره تاریخی به حدود ۵۰ درصد می‌رسد. همچنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد در بین ایستگاه‌های موردبررسی افزایش مقدار بارش فرین نسبت به دوره تاریخی با درصد افزایش بیش از ۲۵ درصد در ایستگاه اراک در هر سه سناریو، در ایستگاه‌های اصفهان و گرگان در سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و در ایستگاه بجنورد در سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 و کاشان در سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تأیید شده است.

در پژوهش حاضر دوره بازگشت و احتمال رخداد بارش‌های فرین در دوره ۲۰۲۶–۲۰۵۰ با ترکیب وزنی ۱۰ مدل مورداستفاده از مدل‌های CMIP6 با در نظر گرفتن مهارت‌های شبیه‌سازی مدل در هر دو الگوی فضایی و تنوع بین‌سالانه و تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 موردبررسی و تحلیل قرار گرفت. با توجه به خطرات رویدادهای بارش فرین ممکن است در آینده این بارش‌های فرین در اکثر مناطق موردمطالعه به‌طور قابل‌توجهی افزایش یابد؛ بنابراین لازم است تلاش‌های بیشتری در کارهای آینده برای بهبود روش وزن‌دهی و انتخاب مدل‌های بیشتر انجام شود. همچنین با توجه به دستاورد این پژوهش لازم است تا در هر منطقه تعداد بیشتری ایستگاه موردبررسی قرار گیرد به‌خصوص در مناطقی مانند استان مرکزی که در این منطقه هر سه سناریو افزایش مقدار بارش فرین را نسبت به دوره تاریخی در دوره بازگشت‌های مختلف نشان داد.

References

Alijani, B., & Afshar Manesh, H. (2015). Statistical analysis of long-term precipitation data for fitting an appropriate statistical distribution (Case study: Iran). *Zagros Quarterly Journal of Geography and Urban Planning*, 7(25), 73-95. [In Persian] https://sanad.iau.ir/Journal/zagros/Article/937845

Alijani, B., O'Brien, J., & Yarnal, B. (2008). Spatial analysis of precipitation intensity and concentration in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 94, 107-124. https://doi.org/10.1007/s00704-007-0344-y

Alizadeh, A. (2015). *Principles of Applied Hydrology* (40th ed.). Mashhad: Imam Reza University Press. [In Persian]

Allen, M. R., & Ingram, W. J. (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, *419*(6903), 224-232. https://doi.org/10.1038/nature01092

Asadi, A., & Akbari Azirani, T. (2021). Analysis of variations the beginning and ending of precipitations with tending models in western south of Iran. *Sustainable Development of Geographical Environment*, *3*(4), 99-107. [In Persian] https://doi.org/10.52547/SDGE.3.4.99

Azizi, H., & Nejatian, N. (2022). Evaluation of the climate change impact on the intensity and return period for drought indices of SPI and SPEI (study area: Varamin plain). *Water Supply*, 22(4), 4373-4386. https://doi.org/10.2166/ws.2022.056

Berg, P., Moseley, C., & Haerter, J. O. (2013). Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. *Nature Geoscience*, *6*(3), 181-185. https://doi.org/10.1038/ngeo1731

Chen, H. (2013). Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models. *Chinese Science Bulletin*, *58*, 1462-1472. https://doi.org/10.1007/s11434-012-5612-2

Chen, H., Sun, J., Chen, X., & Zhou, W. (2012). CGCM projections of heavy rainfall events in China. *International Journal of Climatology*, *32*(3), 441-450. https://doi.org/10.1002/joc.2278

Chen, W., Jiang, Z., & Li, L. (2011). Probabilistic projections of climate change over China under the SRES A1B scenario using 28 AOGCMs. *Journal of Climate*, *24*(17), 4741-4756. https://doi.org/10.1175/2011JCLI4102.1

Dike, V. N., Lin, Z. H., & Ibe, C. C. (2020). Intensification of summer rainfall extremes over Nigeria during recent decades. *Atmosphere*, *11*(10), 1084. https://doi.org/10.3390/atmos11101084

Hawkins, E., & Sutton, R. (2011). The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate dynamics*, *37*, 407-418. https://doi.org/10.1007/s00382-010-0810-6

Hong, J., Javan, K., Shin, Y., & Park, J. S. (2021). Future projections and uncertainty assessment of precipitation extremes in Iran from the CMIP6 ensemble. *Atmosphere*, *12*(8), 1052. https://doi.org/10.3390/atmos12081052

IPCC. (2020). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/

Javan, K., Movaghari, A., & Park, J. S. (2023). Projected changes in extreme precipitation indices over the Lake Urmia basin in Iran. *Journal of Water and Climate Change*, *14*(8), 2564-2582. https://doi.org/10.2166/wcc.2023.447

Jiang, Z., Li, W., Xu, J., & Li, L. (2015). Extreme precipitation indices over China in CMIP5 models. Part I: Model evaluation. *Journal of Climate*, *28*(21), 8603-8619. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0099.1

Khansalari, S., & Mohammadi, S. A. (2023). Projection of extreme precipitation over Iran based on the ensemble approach of CMIP6 models in the near future (2026-2050) with rank-based

weighting. *Journal of the Earth and Space Physics*, *49*(3), 727-746. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.351711.1007476

Lee, Y., Paek, J., Park, J. S., & Boo, K. O. (2020). Changes in temperature and rainfall extremes across East Asia in the CMIP5 ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, *141*, 143-155. https://doi.org/10.1007/s00704-020-03180-w

Lin, Q. J., & Yu, J. Y. (2022). The potential impact of model horizontal resolution on the simulation of atmospheric cloud radiative effect in CMIP6 models. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, *33*(1), 21. https://doi.org/10.1007/s44195-022-00021-3

Loucks, D. P., Stedinger, J. R., & Haith, D. A. (1981). *Water Resource Systems Planning and Analysis*. Prentice-Hall.

Mann, M. E., & Kump, L. R. (2015). *Dire predictions: Understanding climate change*. Pearson.

Meehl, G. A., Senior, C. A., Eyring, V., Flato, G., Lamarque, J. F., Stouffer, R. J., … & Schlund, M. (2020). Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6 Earth system models. *Science Advances*, *6*(26), eaba1981. https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1981

Peng, Y., Zhao, X., Wu, D., Tang, B., Xu, P., Du, X., & Wang, H. (2018). Spatiotemporal variability in extreme precipitation in China from observations and projections. *Water*, *10*(8), 1089. https://doi.org/10.3390/w10081089

Ruckstuhl, C., Philipona, R., Morland, J., & Ohmura, A. (2007). Observed relationship between surface specific humidity, integrated water vapor, and longwave downward radiation at different altitudes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *112*(D3). https://doi.org/10.1029/2006JD007850

Sarabi, M., Dastorani, M. T., & Zarrin, A. (2020). Investigating Impact of Future Climate Changes on Temperature and Precipitation condition (Case Study: Torogh Dam Watershed, Mashhad). *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, *3*(1), 63-83. doi: 10.22034/jmas.2021.278862.1129. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jmas.2021.278862.1129

Sarabi, M., Dastorani, M. T., & Zarrin, A. (2021). The Impact of Future Climate Change on Hydrological Response in Torogh Dam Watershed, Mashhad. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, *3*(4), 310-330. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jmas.2021.297763.1149

Shahabfar, A., & Qiyami, A. (2001). Evaluation of goodness-of-fit methods for statistical distribution functions and the use of time series for annual rainfall prediction in Mashhad. In *Proceedings of the First National Conference on Water Crisis Management Strategies, Zabol, Iran*. [In Persian] https://civilica.com/doc/81273/

Tang, B., Hu, W., & Duan, A. (2021). Future projection of extreme precipitation indices over the Indochina Peninsula and South China in CMIP6 models. *Journal of Climate*, *34*(21), 8793-8811. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0946.1

Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *106*(D7), 7183-7192. https://doi.org/10.1029/2000JD900719

Trenberth, K. E., Jones, P. D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., ... & Zhai, P. (2007). Observations. surface and atmospheric climate change. Chapter 3. https://cig.uw.edu/publications/observations-surface-and-atmospheric-climate-change/

Yazdandoost, F., Moradian, S., Izadi, A., & Aghakouchak, A. (2021). Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison. *Atmospheric Research*, *250*, 105369. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105369

Zareian, M. (2022). Effects of climate change on temperature and precipitation in yazd province based on combined output of CMIP6 models. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 26(2), 91-105. [In Persian] http://dx.doi.org/10.47176/jwss.26.2.31501

Zarrin, A., & Dadashi Roudbari, A. (2022b). Investigating Precipitation Return Period and its Probability of Occurrence in Iran based on Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *10*(4), 209-227. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.71102.1079

Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021b). Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, *144*, 643-660. https://doi.org/10.1007/s00704-021-03568-2

Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2022a). Technical Note: Assessing the Effect of Climate Change on Heavy Precipitation in Iran Based on a CMIP6 Ensemble Model. *Journal of Water and Sustainable Development*, *8*(4), 119-124. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.24235474.1400.8.4.14.9

Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2021a). Projected consecutive dry and wet days in Iran based on CMIP6 bias-corrected multi-model ensemble. *Journal of the Earth and Space Physics*, *47*(3), 561-578. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jesphys.2021.319270.1007295

Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., & Hassani, S. (2022c). Future changes in precipitation extremes over Iran: Insight from a CMIP6 bias-corrected multi-model ensemble. *Pure and Applied Geophysics*, *179*, 441-464. https://doi.org/10.1007/s00024-021-02904-x

Zhai, P., Zhang, X., Wan, H., & Pan, X. (2005). Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *Journal of Climate*, *18*(7), 1096-1108. https://doi.org/10.1175/JCLI-3318.1

Zhang, W., & Zhou, T. (2019). Significant increases in extreme precipitation and the associations with global warming over the global land monsoon regions. *Journal of Climate*, *32*(24), 8465-8488. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0662.1